

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
4. August 2005 (04.08.2005)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2005/070286 A1

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: A61B 5/00,
G01B 9/02, G01N 21/47

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2005/000076

(22) Internationales Anmeldedatum:
20. Januar 2005 (20.01.2005)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2004 003 484.2 23. Januar 2004 (23.01.2004) DE
10 2004 033 187.1 9. Juli 2004 (09.07.2004) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme
von US): MEDIZINISCHES LASERZENTRUM LUE-
BECK GMBH [DE/DE]; Peter Monnik Weg 4, 23562
Luebeck (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): KOCH, Peter
[DE/DE]; Fuechtingstr. 17, 23558 Luebeck (DE).
KOCH, Edmund [DE/DE]; Lene-Glatzer-Strasse 12B,
01309 Dresden (DE).

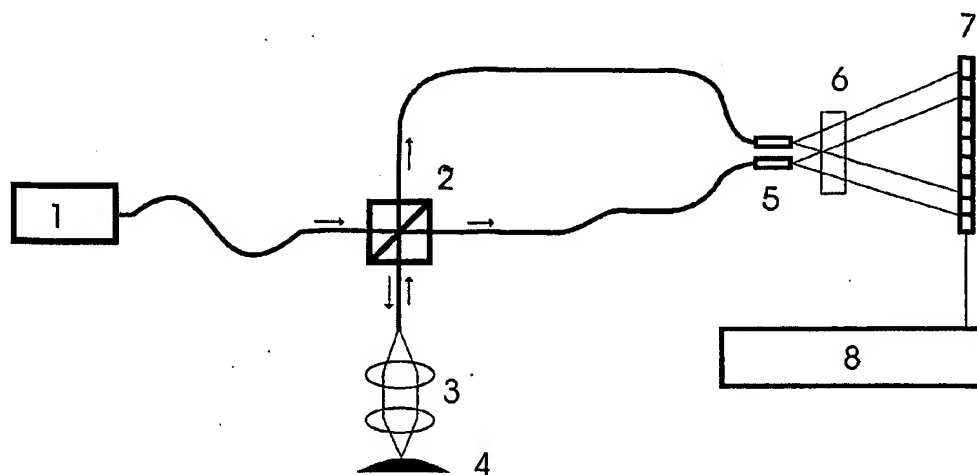
(74) Anwalt: BIEHL, Christian; Boehmert & Boehmert, Nie-
mannsweg 133, 24105 Kiel (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI,
GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE,
KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD,
MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG,
PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: INTERFEROMETRIC DEVICE

(54) Bezeichnung: INTERFEROMETRISCHE VORRICHTUNG



$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} < \left| 1 - \frac{F}{M} \right| < \frac{1}{2} \frac{F}{P} - \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \quad (I)$$

(57) Abstract: The invention relates to a device for white light interferometry comprising a light source having a main emission wavelength λ_0 and spectral width $\Delta\lambda$ and an evaluation unit provided with a linear sensor of a pixel width P for detecting the interference fringe patterns in an interfringe distance F , wherein a mask which is placed in front the linear sensor exhibits a permeability with respect to periodically modulated along said linear sensor light and wherein the period length of the mask M is arranged in such a way that the condition (I) is satisfied.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2005/070286 A1



TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

- (84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht
- vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) **Zusammenfassung:** Vorrichtung zur Weisslichtinterferometrie umfassend eine Lichtquelle der Hauptemissionswellenlänge λ_0 und der spektralen Breite $\Delta\lambda$ und eine Auswerteeinheit mit einem Zeilensensor der Pixelbreite P zum Erfassen eines Interferenzstreifenmusters mit Streifenabstand F , wobei vor dem Zeilensensor eine Maske angeordnet ist, die eine periodisch modulierte Lichtdurchlässigkeit längs des Zeilensensors aufweist, wobei die Periodenlänge der Maske M so eingerichtet wird, dass die Bedingung erfüllt ist.

Interferometrische Vorrichtung

Die Erfindung betrifft eine interferometrische Vorrichtung nach dem Oberbegriff des Hauptanspruchs. Vorrichtungen zur optischen Kohärenztomographie (OCT) umfassen ein Interferometer und eine Auswerteeinheit zum elektronischen Erfassen eines Interferenzmusters.

Interferometer und Verfahren zur Ermittlung der Laufzeitverteilung von reflektiertem bzw. gestreutem Licht sind unter der Bezeichnung „Optical Coherence Tomography (OCT)“ geläufig. Beispielsweise wird in DE 199 29 406 A1 ein solches Verfahren zur mikroskopischen Auflösung von Oberflächenstrukturen wie auch zur Messung der Rückstreuung aus verschiedenen Tiefenlagen einer Probe vorgestellt. Das dort beschriebene Interferometer basiert auf dem bekannten Michelson-Interferometer und verwendet Licht aus dem nahen Infrarotspektrum mit sehr kurzer Kohärenzlänge. Das Licht wird zuerst in einen Proben- und einen Referenzanteil aufgeteilt, auf die Probe bzw. auf einen Spiegel gelenkt, dort zurückgestreut bzw. reflektiert, nach Einkopplung in Lichtleiterfasern in eine Detektionseinheit geführt und dort zur Interferenz gebracht. Das Interferometer nach der DE 199 29 406 A1 arbeitet – im Unterschied zu zeitaufgelösten OCT-Interferometern – ohne bewegte Teile (\square NoMotion OCT), insbesondere ohne den üblichen Phasenmodulator zur Veränderung der Lichtlaufzeit im Referenzarm. Vielmehr tritt das aus dem Probenzweig und dem Referenzzweig des Interferometers zurückkehrende Licht an zwei verschiedenen Orten in die Auswerteeinheit ein, in der es räumlich überlagert wird, wobei anhand der räumlichen Intensitätsverteilung in diesem überlagerten Bereich die Laufzeitverteilung des Lichts im Probenzweig bestimmt wird. Es entsteht in Analogie zum bekannten Doppelspaltversuch ein Muster aus Interferenzstreifen (Fringes) auf einem Detektionsschirm.

Dabei ergibt sich aufgrund der Laufzeitverteilung des Probenlichts eine Intensitätsverteilung entlang des Interferenzmusters, d.h. die tiefenaufgelöste Information über die Probe ist in der räumlichen, zeitlich stationären Struktur des Interferenzlichts enthalten. Eine typische Ausgestaltung dieses Schirms, insbesondere für die rechnergestützte Auswertung, ist ein linearer Bildsensor. Gängig ist auch die im Folgenden verwendete Bezeichnung Zeilensensor, wobei dieser i. a. aus mehreren Zeilen von Pixeln bestehen kann.

Die auf den Zeilensensor einfallende Lichtintensität besteht in der OCT aus einem dominanten, längs des Zeilensensors konstanten Hintergrund, der keine Probeninformation trägt, und einem mit der Zeilenkoordinate (oder Pixelindex) veränderlichen Anteil, der gewöhnlich mehrere Größenordnungen kleiner als der Hintergrund ist. Der veränderliche Anteil lässt sich als Produkt einer schnell oszillierenden Trägerwelle – Interferenzfringes mit Fringeabstand F oder Wellenzahl $\kappa_F = 2\pi/F$ – mit einer langsam veränderlichen Amplitudenmodulation $\alpha(x)$ als Funktion der Zeilenkoordinate x beschreiben, so dass eine normierte Intensität etwa gegeben ist durch

$$(1) \quad I_0(x) := 1 + \alpha(x) \cos(\kappa_F x + \varphi)$$

wobei φ die i. a. unbekannte Phase ist. Das in der OCT interessierende Signal gewinnt man aus der in jedem Pixel durch Lichtabsorption erzeugten, messbaren Ladung zunächst in der Gestalt einer nach der Pixelanordnung indizierten Folge $S(n)$, $n=0, \dots, N-1$ mit N als Zahl der Pixel auf dem Zeilensensor. Bei Pixeln der Breite P ergibt sich das n -te Folgenglied etwa zu

$$(2) \quad S(n) \approx \int_{-P/2+nP}^{P/2+nP} I_0(x) dx$$

und mit Hilfe einer rechnergestützten Auswertung wird hiernach die gesuchte Modulation $\alpha(x)$ approximiert. Dabei setzt man voraus, dass α über einen einzelnen Pixel hinweg in guter Näherung als Konstante, $\alpha(n)$, angesehen werden kann. Die Integrationsaufgabe betrifft also in erster Linie die schnell veränderliche Trägerwelle. Das Abtasttheorem verlangt, diese Trägerwelle pro Fringeabstand F an mindestens zwei Stellen abzutasten, um vom Informationsgehalt nichts zu verlieren.

Bei einer OCT-Vorrichtung ohne bewegte Teile beträgt F typisch einige zehn Mikrometer, und die Pixelbreite gängiger Sensoren liegt unter 10 Mikrometer. Mit einer solchen Vorrichtung kann eine Scantiefe von etwa 100 μm erreicht werden, wohingegen diese bei zeitaufgelösten Systemen bis zu 2 mm beträgt. Um solche Scantiefen auch mit einem Zeilensensorsystem zu erzielen, müssten sehr viel mehr Fringes vom Zeilensensor erfasst werden, d.h. der Fringeabstand F müsste kleiner eingerichtet sein und der Sensor mehr Pixel auf engerem Raum aufweisen. Eine Abschätzung für diese Anzahl N lautet:

$$(3) \quad N = 2 \cdot 2 \cdot \frac{nD}{\lambda},$$

wobei λ die mittlere Wellenlänge, D die Scantiefe und n der Brechungsindex der Probe ist. Dies führt auf Zeilensensoren mit ca. 10.000 Pixeln. Zwar gibt es heute solche CCD-Sensoren, doch ist der Aufwand zur schnellen Digitalisierung der Signale hoch, und auch die maximal speicherbare Lichtmenge ist bei diesen Sensoren gering. Besser geeignet wären CMOS-Sensoren, bei denen sich aber derartig hohe Pixelzahlen nicht ohne weiteres erzielen lassen.

Aus der DE 37 30 091 A1 ist bekannt, die Aufzeichnung eines räumlichen Interferenzmusters mit einem Zeilensensor durch Ausnutzung des Moiré-Effekts zu verbessern. Dazu wird ein optisches Gitter (auch: Maske) mit periodischer Hell-Dunkel-Struktur vor dem Zeilensensor angeordnet, wobei die Gitterkonstante (auch: Maskenperiode M = Breite eines Hell-Dunkel-Zyklus) so eingerichtet wird, dass sie dem Fringeabstand F des Interferogramms möglichst genau entspricht. Diese Vorgehensweise kommt dem optischen Abwärtsmischen von Signalen auf ein niederfrequentes Zwischenband gleich, wobei nach der Lehre der DE 37 30 091 A1 vorzugsweise auf die Differenzfrequenz Null gemischt werden soll. Im Ergebnis wird dann nur die gesuchte Einhüllende $a(x)$ der Intensitätsmodulation auf den Zeilensensor abgebildet, und diese kann mit der herkömmlichen Pixelzahl leicht abgetastet werden.

Die Verwendung einer Maske nach der DE 37 30 091 A1 ist aber nicht ohne Nachteil. Das auf jeden Pixel einfallende Licht setzt sich aus je einem Anteil des Interferenzlichts und des inkohärenten Untergrunds zusammen (s. Gleichung (1)), wobei letzterer dominiert. Auf einem einzelnen Pixel lassen sich beide Anteile nicht trennen. Vielmehr müsste man benachbarte Pixel miteinander vergleichen und Differenzen bilden. Dies scheitert jedoch in der Praxis daran, dass aus beleuchtungstechnischen Gründen auch die Intensität des Untergrunds nicht auf allen Pixeln gleich ist. Zudem hängt der Interferenzlichtbeitrag zum Signal $S(n)$ auf dem n -ten Pixel gemäß Gleichungen (1) und (2) von der eher zufälligen Phasenlage der Intensitätsmodulation I_0 gegenüber der Maske ab. Im ungünstigsten Fall kann dieser Beitrag bei Integration über die Pixelbreite sogar verschwinden.

Die DE 37 30 091 A1 schlägt zur Vermeidung dieser Nachteile vor, die Länge des Referenzarms des Interferometers zeitlich zu variieren. Dies kann zum einen zur gezielten Weglängenänderung um z.B. $\pm \lambda/4$ genutzt werden, was die Phasenlage um $\pm 90^\circ$ verschieben würde. Zum anderen kann durch periodisches Ändern des Referenzarms mit definierter Frequenz auf jedem Pixel ein zeitlich veränderliches Signal erfasst werden, dessen Variation allein dem Interferenzlicht zuzuschreiben ist. Diese Variation kann dann herausgefiltert werden.

Will man indes keine beweglichen Komponenten realisieren, insbesondere keinen veränderlichen Referenzarm, so ist die Verwendung einer Maske nach der Lehre der DE 37 30 091 A1 aus den genannten Gründen eher nachteilig.

Es ist nun Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine interferometrische Vorrichtung mit Zeilensensor, insbesondere zur OCT, anzugeben, die keine bewegten Teile, insbesondere keinen zeitlich veränderlichen Referenzarm, enthält und doch die einfache Trennung von Nutzsignal und Hintergrund erlaubt, wenn mehrere Interferenzfringes auf jeden einzelnen Pixel entfallen.

Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Interferometer nach Anspruch 1. Die Unteransprüche geben vorteilhafte Ausgestaltungen an.

Die Erfindung wird anhand folgender Figuren erläutert:

- Figur 1. zeigt den schematischen Aufbau eines NoMotion-OCT-Interferometers nach dem Prinzip des Michelson-Interferometers.
- Figur 2 zeigt ein typisches Signal, wie es auf dem Zeilensensor gemessen wird, wenn sich ein Spiegel im Probenarm befindet. Die Intensität des Signalanteils des Interferenzlichts ist gegen den Pixelindex des Zeilensensors aufgetragen.
- Figur 3 zeigt ein Beispiel für die Erzeugung einer Maske auf den Pixeln des Zeilensensors durch Bedeckung mit metallischen Dots.
- Figur 4 skizziert die Wirkungsweise einer Prismenmaske als Alternative zu einer Ausblendungsmaske.

Fig. 1 stellt dabei eine zur OCT geeignete interferometrische Vorrichtung ohne bewegte Teile dar. Das Licht aus einer breitbandigen Lichtquelle 1 mit kurzer Kohärenzlänge wird durch einen Strahlteiler 2 (oder Faserkoppler) in Referenz- und Probenstrahl aufgeteilt. Der Probenstrahl wird über eine Abbildungsoptik 3 auf die Probe 4 gelenkt und von dieser zurückgestreut. Das Proben- und Referenzlicht werden über getrennte Lichtleiterfasern in eine Auswerteeinheit geführt, wo die Strahlen aus beabstandeten Faserenden 5 austreten und über eine Zylinderlinse 6 auf einen Detektor 7 (Zeilensensor) gelangen. Analog zum

klassischen Doppelspalt-Experiment entsteht auf dem Detektor ein Interferenzstreifenmuster entlang der Sensorzeile, das elektronisch von einer Aufzeichnungseinrichtung 8 erfasst und weiterverarbeitet wird.

Fig. 2 zeigt das typische Ergebnis einer Messung, wenn die Probe durch einen Spiegel ersetzt wird. Bezugszeichen 10 weist auf eine Reihe von Prismen hin, 12 auf die Pixel.

Es wird besonders darauf hingewiesen, dass sich der Fringeabstand F der Interferenzstreifen auf dem Zeilensensor 7 aus den benutzten Lichtwellenlängen und dem Abstand der Austrittsenden 5 voneinander sowie zum Detektor 7 bestimmt. Geht man von ebenen Lichtwellenfronten aus, ist F allein eine Funktion des von den Lichtstrahlen eingeschlossenen Winkels, der sich aus den genannten Abständen berechnen lässt. In Fig. 1 sind die beiden Austrittsfasern 5 exemplarisch parallel ausgerichtet. Beispielsweise ließe sich F weiter verringern, wenn eines der beiden Faserenden 5 zusätzlich noch seitlich verschwenkt würde.

Um eine Scantiefe zu erreichen, die mit der von zeitaufgelösten OCT-Vorrichtungen vergleichbar ist, wird man F so einrichten, dass mehrere Interferenzstreifen auf jeden einzelnen Pixel entfallen. Das damit auftretende Abtastproblem wird nun auch mit Hilfe einer periodischen Maske gelöst, die bevorzugt unmittelbar vor oder auf den Pixeln des Zeilensensors angeordnet wird. Im Unterschied zur DE 37 30 091 A1 orientiert sich die Wahl der Maskenperiode M dabei aber nur mittelbar am Fringeabstand F , wie die nachstehende Diskussion erklären soll. Eine genaue Übereinstimmung von M und F , wie von der DE 37 30 091 A1 gefordert, soll sogar vermieden werden. Man wird vielmehr bevorzugt F stets so einrichten, dass es sich von M signifikant unterscheidet.

Die Maske wird bevorzugt so gestaltet, dass ihre Lichtdurchlässigkeit zwischen undurchlässig und transparent variiert (maximaler Kontrast), und die Maske im Mittel die halbe Lichtintensität durchlässt. Dies lässt sich insbesondere erreichen, wenn der Verlauf der Durchlässigkeit (\rightarrow Maskenfunktion) entlang des Zeilensensors einer einfachen mathematischen Funktion wie etwa einer Rechteck-, Sägezahn- oder Sinusfunktion folgt.

Das auf den Sensor einfallende Licht mit einer Intensitätsverteilung gemäß Gleichung (1) wird beim Durchqueren der Maske mit der Maskenfunktion multipliziert. Mit der Wellenzahl der Maskenperiode $\kappa_M = 2\pi/M$ ergibt sich, dass das effektiv auf dem Sensor messbare, gemischte Signal nunmehr Anteile der Differenzfrequenz $\kappa_F - \kappa_M$ und der Summenfre-

quenz $\kappa_F + \kappa_M$ enthält, wobei letzterer durch Tiefpassfilterung aus der Auswertung entfernt wird und keine Rolle spielt.

Es bleibt also die Aufgabe, ein Intensitätssignal der Gestalt

$$(4) \quad I^M_0(x) \sim \alpha(x) \cos((\kappa_F - \kappa_M)x)$$

mit dem Sensor zu erfassen und auszuwerten. Dies entspricht nun einer niederfrequenten Trägerwelle multipliziert mit der Amplitudenmodulation $\alpha(x)$, die die Probeninformation enthält.

Um jede Vollwelle der Trägerwelle mit mindestens zwei Pixeln abzutasten, muss gelten

$$(5) \quad 2P < \frac{2\pi}{|\kappa_F - \kappa_M|},$$

und man kann und wird das Interferenzmuster grundsätzlich so einrichten, dass $|\kappa_F - \kappa_M|$ dabei von Null verschieden ist, da man – wie bereits dargelegt – sonst nicht auf die zeitliche Variation des Referenzarms verzichten könnte.

Bezeichnet man mit $\kappa_P = 2\pi/P$ die Pixelwellenzahl, so lässt sich die Aufgabe der erfindungsgemäßen Maske so verstehen, dass Sie einen Wellenzahlumklapp der wahren Fringewellenzahl in das abtastbare Nyquist-Intervall

$$(6) \quad 0 < |\kappa_F - \kappa_M| < \frac{1}{2}\kappa_P$$

bewirken soll. Allerdings reicht das Realisieren der Bedingung in Ungleichung (6) für gute Messergebnisse in der OCT noch nicht zwingend aus. Das bis hier benutzte Bild einer einzelnen, amplitudenmodulierten Trägerwelle, die es abzutasten gilt, ist häufig sinnvoll. Aber hier ist ein anderes Bild besser geeignet.

Bei der OCT handelt es sich um einen Spezialfall der Weißlichtinterferometrie, d.h. die Lichtquelle emittiert ein endlich breites Spektrum von Wellenlängen um eine Zentralwellenlänge λ_0 herum verteilt. Beispielsweise kann man annehmen, das für die Messung verwertbare Spektrum sei durch $[\lambda_0 - \Delta\lambda, \lambda_0 + \Delta\lambda]$ gegeben, wenn $\Delta\lambda$ die spektrale Breite der Lichtquelle bezeichnet. Das auf dem Zeilensensor entstehende, amplitudenmodulierte Streifenmuster mit dem Fringeabstand F ist eine Superposition von Streifenmustern mit Wellenzahlen aus einem kontinuierlichen Intervall $[\kappa_F^0 - \Delta\kappa, \kappa_F^0 + \Delta\kappa]$, wobei κ_F^0 – die

dominante, mittlere Fringewellenzahl, von der bisher die Rede war – der Wellenlänge λ_0 zugeordnet sein soll und dann näherungsweise

$$(7) \quad \Delta\kappa \approx \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \kappa_F^0$$

gilt. Zur Befriedigung der Abtastbedingung ist eine Maske vor der Sensorzeile nun so einzurichten, dass das Umklappen in das Nyquist-Intervall für alle beitragenden Wellenzahlen $\kappa_F \in [\kappa_F^0 - \Delta\kappa, \kappa_F^0 + \Delta\kappa]$ simultan erfolgen kann. Dabei dürfen beim Umklappen aber keine abwärts gemischten Wellenzahlen mit unterschiedlichen Vorzeichen entstehen, d.h. gefordert ist

$$(8) \quad 0 < \frac{\kappa_F - \kappa_M}{\kappa_P} < \frac{1}{2} \quad \text{oder} \quad 0 > \frac{\kappa_F - \kappa_M}{\kappa_P} > -\frac{1}{2}$$

für jeweils alle $\kappa_F \in [\kappa_F^0 - \Delta\kappa, \kappa_F^0 + \Delta\kappa]$ mit einer fest gewählten Maske, bzw. einem festen κ_M . Würden Wellenzahlen gleichen Betrags aber entgegen gesetzter Vorzeichen entstehen, so wären die Signalbeiträge der zugehörigen Lichtanteile im weiteren Verlauf der Auswertung – insbesondere nach der Tiefpassfilterung – nicht mehr voneinander zu unterscheiden. Man verlöre einen signifikanten Anteil der über das gesamte Nutzspektrum verteilten Probeninformation.

Offenbar sind die genannten Forderungen insbesondere dann erfüllt, wenn man anstelle der Ungleichungen (8) verlangt

$$(9) \quad \Delta\kappa < |\kappa_F^0 - \kappa_M| < \frac{1}{2} \kappa_P + \Delta\kappa$$

oder unter Benutzung von Gleichung (7)

$$(9) \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} < \left| 1 - \frac{\kappa_M}{\kappa_F^0} \right| < \frac{1}{2} \frac{\kappa_P}{\kappa_F^0} - \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0},$$

wobei λ_0 , $\Delta\lambda$ und κ_P apparativ vorgegeben und κ_F^0 vom Experimentator wählbar oder bestimmbar ist. Ungleichung (9) legt dann erfindungsgemäß ein günstiges Intervall für die Wahl einer Maske vor dem Zeilensensor fest, wobei hervorzuheben ist, dass κ_M größer oder kleiner als κ_F^0 sein darf, doch eine Übereinstimmung ist ausgeschlossen.

Kehrt man nun in das eingangs benutzte Bild einer einzelnen Trägerwelle auf dem Zeilensensor gemäß Gleichung (4) zurück, lässt sich Ungleichung (9) geeignet schreiben als

$$(10) \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} < \left| 1 - \frac{F}{M} \right| < \frac{1}{2} \frac{F}{P} - \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

Beispiel: Um mit einem Zeilensensor der Pixelbreite $P = 8 \mu\text{m}$ ein Interferenzmuster mit Fringeabstand $F = 2,5 \mu\text{m}$ aufzuzeichnen, soll eine geeignete Maske bestimmt werden. Die Lichtquelle emittiere bei $\lambda_0 = 830 \text{ nm}$ mit einer spektralen Breite $\Delta\lambda = 40 \text{ nm}$, d.h. das zur OCT genutzte Spektrum liege zwischen 790 nm und 870 nm . Nach Ungleichung (10) ergibt sich sofort, dass Maskenperiode und Fringeabstand sich unterscheiden haben um einen Wert zwischen $4,8 \%$ und $10,8 \%$.

Das durch die erfindungsgemäße Maske entstehende Signal nach Gleichung (4) kann jetzt mit dem Zeilensensor erfasst und mittels eines Bandpassfilters bearbeitet werden, der nur Intensitätsbeiträge in der Frequenzumgebung der Trägerfrequenz $|\kappa_F - \kappa_M|$ isoliert. Die gesuchte Einhüllende ergibt sich dann durch Betragsbildung aus dem gefilterten Signal. Der Untergrund wird auf diese Weise abgezogen, und die Phasenlage gegenüber Maske und Sensor spielt keine Rolle, weil sie sich nur auf die Lage der Nulldurchgänge der Trägerwelle auswirkt. Da diese nun mit der gegebenen Pixelauflösung gut abgetastet werden kann, ist ihre Einhüllende stets mit der gleichen Genauigkeit bestimmbar.

Es kann geschehen, dass Ungleichung (10) keine Lösungen mehr anbietet, z.B. wenn die linke Seite die Rechte übersteigt. Dies wird insbesondere geschehen, wenn Lichtquellen mit zu großer spektraler Breite benutzt oder eine zu große Zahl von Fringes auf ein einzelnes Pixel abgebildet werden. In solchen Fällen kann die Maske keine Hilfe mehr sein. Ohnehin würde man für große κ_M mit erheblichen Fertigungsschwierigkeiten rechnen müssen.

Es ist vorteilhaft, wenn die Anzahl von Maskenperioden pro Pixelbreite P eine ganze Zahl ist, d.h. bevorzugt $P = nM$ mit $n = 1, 2, 3, \dots$. Anderenfalls könnten Messartefakte entstehen, insbesondere durch den Schatten der Maske, der durch die gleichmäßige, inkohärente Untergrundbeleuchtung auf die Pixel fällt. Dies würde sich besonders bei Pixeln mit über die Pixelbreite konstanter Empfindlichkeit nachteilig auswirken. Im obigen Beispiel wäre also die Wahl $M = P/3 = 2,67 \mu\text{m}$ sehr günstig und innerhalb der Spezifikation von Ungleichung (9), denn dann wäre $|1 - \kappa_M/\kappa_F| = 6,25 \%$.

Eine vorteilhafte Ausführungsform der erfindungsgemäßen Maske besteht in der Erzeugung eines Metallisierungslayers auf den Pixeln während der Halbleiterfertigung. Metallisierungslayer sind in CMOS Prozessen ohnehin vorgesehen und dienen da normalerweise der Kontaktierung einzelner Transistoren, sie können aber problemlos auch zur Abdek-

kung von Teilen der Pixel benutzt werden. Da sie ohnehin Teil des CMOS Prozesses sind, entstehen während der Fertigung auch keine Mehrkosten. Besonders interessant ist dieser Ansatz, weil hier im Prinzip das Layout eines kommerziellen Sensors nur minimal modifiziert werden müsste. Zur Erzeugung eines einer bestimmten Funktion folgenden Verlaufs der Blendendurchlässigkeit entlang der Sensorzeile bietet sich z.B. an, die Bedeckung durch senkrecht zur Zeilenachse statistisch verteilte, metallische Dots vorzunehmen, deren Dichte sich längs des Sensors gemäß der angestrebten Maskenfunktion ändert. Genauso können aber auch feste periodische Muster – wie in Fig. 3 exemplarisch zu sehen – auf die Pixel aufgebracht werden. Tatsächlich kommt es auf die Details der Maskenfunktion für die günstige Wirkung nicht an. Wesentlich ist vielmehr eine möglichst gute Periodizität mit der erfindungsgemäßen Periodenlänge.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung liegt darin, den Zeilensensor samt Maske geeignet zu krümmen, um Verzerrungen des von Punktlichtquellen herrührenden Interferenzmusters im Außenbereich des planaren Schirms zu kompensieren.

Da in der OCT typisch mit sehr kleinen Nutzsignalintensitäten gearbeitet wird, ist es wünschenswert, möglichst keine Lichtanteile durch eine Maske auszublenden. Daher wird als eine aufwendigere, aber womöglich sehr nützliche, Variante eine speziell strukturierte Maske vorgeschlagen, die kein Licht absorbiert, sondern nur eine andere Verteilung des Lichts bewirkt. Vorteilhafterweise besteht diese aus einer Anordnung von Miniprismen oder Linsen, die sich vor einem Zeilensensor mit mindestens 2 Zeilen von Pixeln befindet. Anstelle einer periodischen Ausblendung schickt man eine Hälfte des Lichts auf die zweite Zeile des Detektors, wie dies in Fig. 4 schematisch dargestellt wird. Die Periode, mit der sich die Ablenkrichtungen der Miniprismen abwechseln, entspricht dabei der vorher berechneten Periode der erfindungsgemäßen Maske. Solche Zeilen von Miniprismen lassen sich ähnlich wie Linsenarrays mit Hilfe von Lasern oder auch durch Ätzverfahren realisieren, die aus der Siliziumtechnik bekannt sind. Für Licht der Wellenlänge $1,3\text{ }\mu\text{m}$ lässt sich die Maske auch aus Silizium herstellen.

Neben der Ablenkung über Brechung lässt sich die Ablenkung auch durch Beugungsgitter (aus Intensitätsgründen möglichst Phasengitter) bewirken. Da mechanische Verfahren zur Herstellung entsprechender Transmissionsgitter schwierig sind, sich dafür holografisch-optische Elemente (HOE) hervorragend geeignet. Solche Phasengitter lassen sich auf fotografischem Film preiswert in großen Stückzahlen fertigen.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Weißlichtinterferometrie umfassend eine Lichtquelle der Hauptemissionswellenlänge λ_0 und der spektralen Breite $\Delta\lambda$ und eine Auswerteeinheit mit einem Zeilensensor der Pixelbreite P zum Erfassen eines Interferenzstreifenmusters mit Streifenabstand F , wobei vor dem Zeilensensor eine Maske angeordnet ist, die eine periodisch modulierte Lichtdurchlässigkeit längs des Zeilensensors aufweist, **dadurch gekennzeichnet, dass**

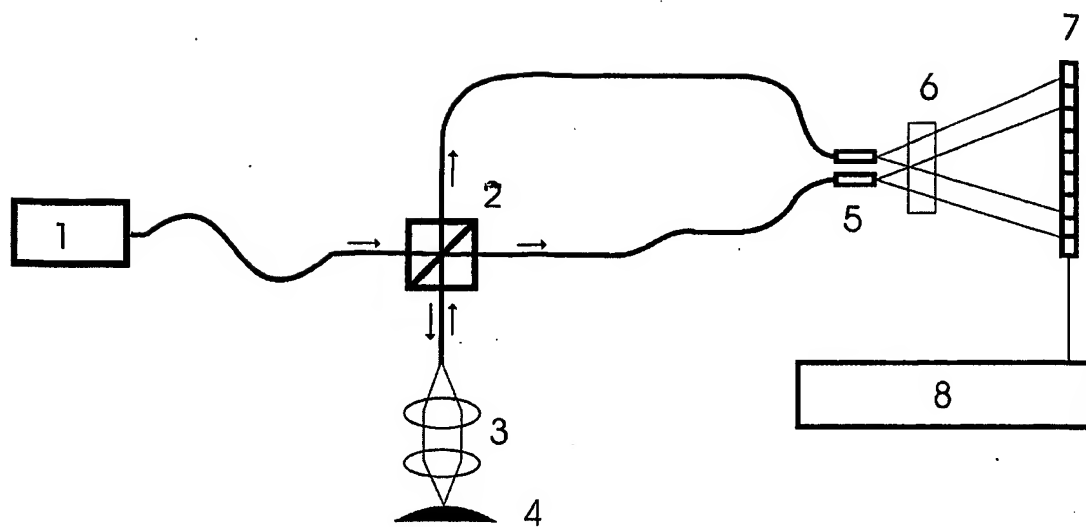
die Periodenlänge M der Maske so eingerichtet ist, dass die Bedingung

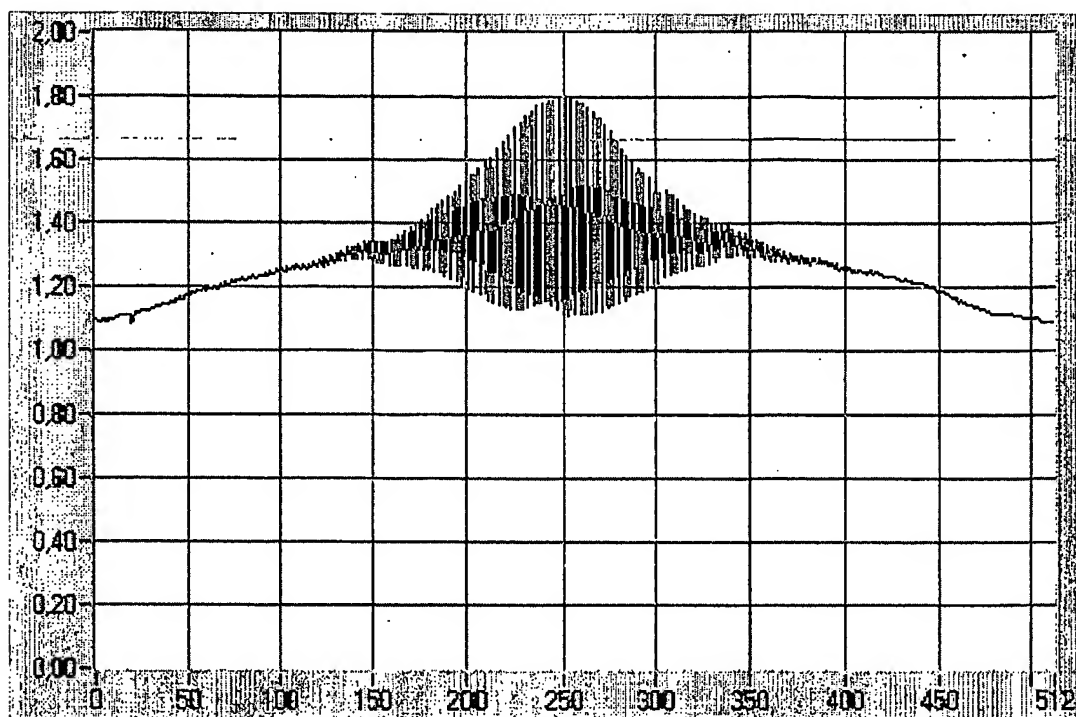
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} < \left| 1 - \frac{F}{M} \right| < \frac{1}{2} \frac{F}{P} - \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

erfüllt ist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Periodenlänge M ein ganzzahliger Bruchteil der Pixelbreite P ist.
3. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Maske durch Bedeckung der Zeilensensorpixel mit einer Vielzahl lichtundurchlässiger Punkte, insbesondere aus Metall, ausgebildet ist.
4. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die lichtundurchlässigen Punkte senkrecht zur Zeilensensorachse statistisch verteilt sind und die Bedeckungsdichte entlang der Achse gemäß einer periodischen Funktion, insbesondere einer Sinus-, Rechteck- oder Sägezahnfunktion, eingerichtet ist.

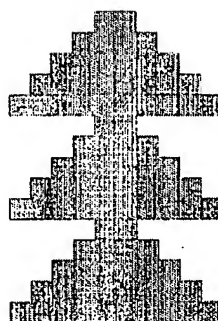
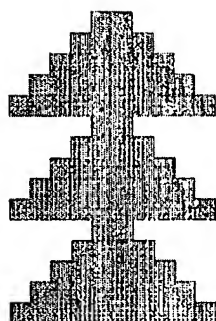
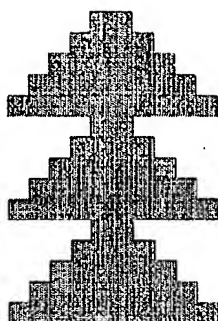
5. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die lichtundurchlässigen Punkte in einer regelmäßigen, entlang des Zeilensensors sich periodisch wiederholenden Anordnung aufgebracht sind.
6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Zeilensensor wenigstens zwei Pixelzeilen umfasst und die Maske als eine sich abwechselnde Anordnung lichtdurchlässiger und lichtablenkender Elemente ausgebildet ist, wobei das abgelenkte Licht von der zweiten Pixelzeile erfasst wird.
7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtablenkung durch Brechung erfolgt.
8. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtablenkung durch Beugung an Gittern erfolgt.

Fig. 1

Fig. 2



Rechteckmaske



Sinusmaske

Fig. 3

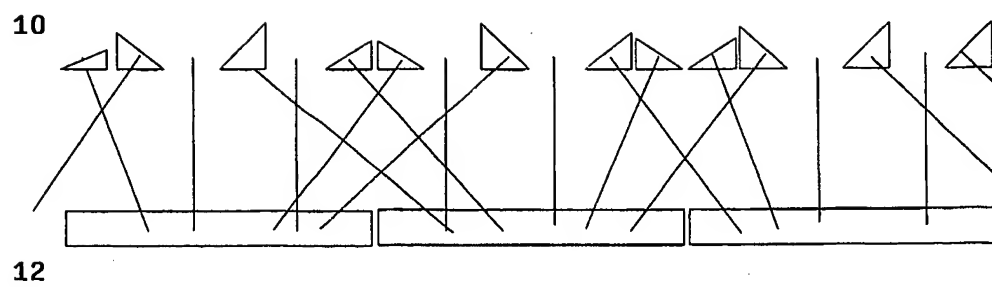


Fig. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/DE2005/000076

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 A61B5/00 G01B9/02 G01N21/47

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 A61B G01B G01N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	DE 37 30 091 A1 (WILD HEERBRUGG AG; WILD LEITZ AG, HEERBRUGG, CH) 6 October 1988 (1988-10-06) cited in the application abstract	1
A	DE 102 07 186 C1 (KNUETTEL, ALEXANDER) 17 April 2003 (2003-04-17) abstract	1
T	KOCH P ET AL: "Linear OCT system with down conversion of the fringe pattern" PROCEEDINGS OF THE SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING SPIE-INT. SOC. OPT. ENG USA, vol. 5316, no. 1, 2004, pages 260-267, XP002328240 ISSN: 0277-786X	



Further documents are listed in the continuation of box C.



Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

T later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

X document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

Y document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

Z document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

24 May 2005

Date of mailing of the international search report

02/06/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Arca, G

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/DE2005/000076

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 3730091	A1	06-10-1988	CH 676289 A5	28-12-1990
			JP 1013403 A	18-01-1989
			JP 2732849 B2	30-03-1998
			US 4929077 A	29-05-1990
DE 10207186	C1	17-04-2003	AU 2003215503 A1	09-09-2003
			CA 2476174 A1	04-09-2003
			WO 03073041 A1	04-09-2003
			DE 10390785 D2	05-01-2005
			EP 1476716 A1	17-11-2004

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/DE2005/000076

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
IPK 7 A61B5/00 G01B9/02 G01N21/47

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
IPK 7 A61B G01B G01N

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der Internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal, INSPEC

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	DE 37 30 091 A1 (WILD HEERBRUGG AG; WILD LEITZ AG, HEERBRUGG, CH) 6. Oktober 1988 (1988-10-06) in der Anmeldung erwähnt Zusammenfassung	1
A	DE 102 07 186 C1 (KNUETTEL, ALEXANDER) 17. April 2003 (2003-04-17) Zusammenfassung	1
T	KOCH P ET AL: "Linear OCT system with down conversion of the fringe pattern" PROCEEDINGS OF THE SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING SPIE-INT. SOC. OPT. ENG USA, Bd. 5316, Nr. 1, 2004, Seiten 260-267, XP002328240 ISSN: 0277-786X	

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

E älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

L Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

O Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

P Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

T Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

Y Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

& Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

24. Mai 2005

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

02/06/2005

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Arca, G

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE2005/000076

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 3730091	A1	06-10-1988	CH 676289 A5 28-12-1990
		JP 1013403 A 18-01-1989	
		JP 2732849 B2 30-03-1998	
		US 4929077 A 29-05-1990	
DE 10207186	C1	17-04-2003	AU 2003215503 A1 09-09-2003
		CA 2476174 A1 04-09-2003	
		WO 03073041 A1 04-09-2003	
		DE 10390785 D2 05-01-2005	
		EP 1476716 A1 17-11-2004	